

§6 Виды сил

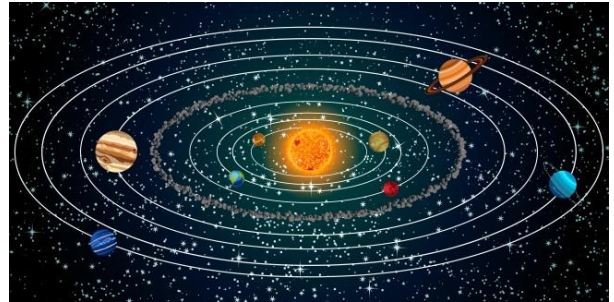
По современным представлениям практически всё многообразие наблюдаемых во Вселенной явлений, обусловлено четырьмя видами фундаментальных взаимодействий.

Фундаментальные взаимодействия – это виды взаимодействия элементарных частиц и состоящих из них тел.

Фундаментальные взаимодействия:

1. Гравитационное (самое слабое)
2. Слабое
3. Электромагнитное
4. Сильное (самое мощное)

↑
возрастание «мощности»



I. Гравитационное взаимодействие

- Наблюдается между любыми массами.
- Роль гравитационного взаимодействия возрастает с увеличением массы тела.
- Обеспечивает стабильное существование:
 - Солнечной системы;
 - звездных скоплений.
- Отвечает на Земле за геофизические процессы, течения рек, приливы и отливы, ходьбу человека (прямохождение).

Гравитационное взаимодействие подчиняется закону «всемирного тяготения».

$$\vec{r}_{21} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1, \quad \vec{r}_{12} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2$$

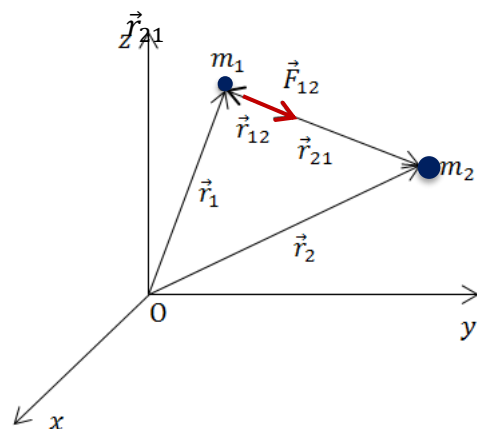
$\vec{F}_{\text{гр}12}$ – сила гравитационного взаимодействия первого тела со вторым, сила притяжения первого тела ко второму.

$$\vec{F}_{\text{гр}12} = -G \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2} \cdot \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}}; \quad |\vec{F}_{\text{гр}12}| = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$\frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}}$ – единичный вектор, определяющий направление действия силы

G – гравитационная постоянная, $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}$.

Силы тяготения между телами, с которыми человеку приходится иметь дело в обычной жизни, очень малы: два золотых шара массами $m_1, m_2 \approx 10^4 \text{ кг}$ (масса железнодорожного вагона) диаметром 1 м и расположенные вплотную друг к другу будут притягиваться силой $F_{\text{гр}} = 0,01 \text{ Н}$.



С другой стороны, с ростом расстояния между телами r сила взаимодействия $F_{\text{гр}} \sim \frac{1}{r^2}$ — медленно убывает, поэтому при достаточно больших массах силы тяготения могут проявляться на очень больших расстояниях, вплоть до астрономических.

Закон всемирного тяготения позволяет по-иному (чем в §5) вводить понятие массы: если принять первое тело за эталон массы: $m_1 = m_{\text{эт}}$,

$$m = \frac{F_{\text{гр}} r^2}{G m_{\text{эт}}} = \frac{F_{\text{гр}} r^2}{G} — \text{гравитационная масса любого другого тела, } (m_{\text{эт}} = 1 \text{ кг}).$$

Принцип эквивалентности масс: отношение гравитационной и инертной масс одинаково для всех тел

$$\frac{m_{\text{гр}}}{m_{\text{ин}}} = \text{const}$$

Константу в правой части можно принять равной 1, положив равенство гравитационной и инертной масс. В таком виде принцип эквивалентности масс переходит в принцип эквивалентности сил гравитации и инерции, лежащий в основе общей теории относительности А. Эйнштейна.

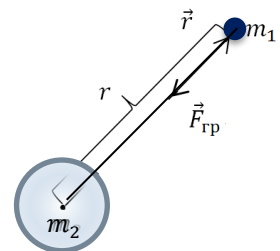
Значит, находясь в какой-либо незамкнутой системе (например, в кабине лифта), вы не сможете определить, вызвано ускорение свободно движущегося тела в ней гравитационным полем (лифт стоит, например, на Земле) или же оно является собственным ускорением неинерциальной системы отсчета, в которой вы находитесь (лифт может двигаться ускоренно 10 м/с^2), иными словами, обусловлено действием силы инерции.

Современные эксперименты, проведённые на орбите, подтвердили справедливость выполнения принципа эквивалентности с точностью до 10^{-14} .

Следствие из принципа эквивалентности масс: ускорение приобретаемое телом под действием силы тяготения не зависит от массы этого тела.

Второй закон Ньютона:

$$\begin{aligned} m_{1\text{ин}} \vec{a}_1 &= \vec{F}_1. \\ m_{1\text{ин}} \vec{a}_1 &= -G \frac{m_{1\text{гр}} m_2}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r} \\ \vec{a}_1 &= -G \frac{m_2}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r} \end{aligned}$$



Вблизи поверхности Земли все тела движутся с одинаковым ускорением ($m_2 = M_3$ — масса Земли, $|\vec{r}| = R_3$ — радиус Земли):

$$a = G \frac{M_3}{R_3^2} = g = 9,81 \dots \text{ м/с}^2 — \text{ускорение свободного падения}$$

$$\vec{F}_{\text{тяж}} = m \vec{g} \text{ (на любое тело у поверхности Земли).}$$

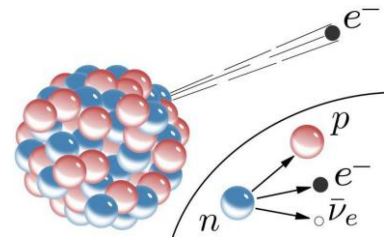
Следует помнить, что ускорение свободного падения в разных точках Земли различно. Оно изменяется от $9,78 \text{ м/с}^2$ на экваторе до $9,82 \text{ м/с}^2$ на полюсах. Различия вызваны вращением Земли, ее формой и внутренней структурой.

II. Слабое взаимодействие

→ Не образует устойчивых систем подобно гравитационному взаимодействию.

→ Отвечает за ядерные реакции (β – распад атомных ядер, распады элементарных частиц).

→ Проявляется на расстояниях, значительно меньших размера атомного ядра: $\approx 10^{-18} \text{ м}$.



III. Электромагнитное взаимодействие

→ Наблюдается между телами в состав, которых входят частицы, обладающие электрическим зарядом.

→ Как и гравитационное взаимодействие обеспечивает стабильное существование: атомов, молекул, а также более крупных молекулярных комплексов и кластеров.

→ Играет важную роль в физико-химических и биологических процессах. Подавляющее большинство физических сил в классической механике: силы упругости, силы трения, силы поверхностного натяжения и т. д. – имеют электромагнитную природу. Электромагнитное взаимодействие определяет большинство физических свойств макроскопических тел и, в частности, изменение этих свойств при переходе из одного агрегатного состояния в другое. Лежит в основе химических превращений. Электрические, магнитные и оптические явления также сводятся к электромагнитному взаимодействию.



Взаимодействие между двумя неподвижными зарядами q_1 и q_2 , расположенными в вакууме на расстоянии $\vec{r}_{21} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ описывается законом Кулона:

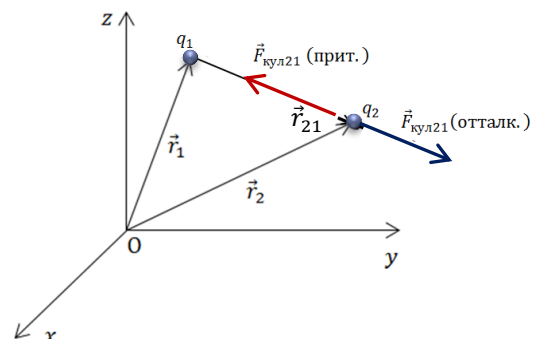
$$\vec{F}_{\text{кул}21} = k \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} \cdot \frac{\vec{r}_{21}}{r_{21}}; \quad F_{\text{кул}21} = k \frac{|q_1| |q_2|}{r_{21}^2}$$

если $q_1 q_2 > 0$ (одноименные заряды),

то между ними действует сила отталкивания $\vec{F}_{\text{кул}21} \uparrow \vec{r}_{21}$.

если $q_1 q_2 < 0$ (разноименные заряды),

то между ними действует сила притяжения $\vec{F}_{\text{кул}21} \updownarrow \vec{r}_{21}$.



Коэффициент пропорциональности $k \approx 9 \cdot 10^9 \frac{\text{м}}{\text{Ф}}$.

Электромагнитное взаимодействие так же, как и гравитационное спадает на больших расстояниях по закону обратного квадрата $F_{\text{кул}} \sim \frac{1}{r^2}$ (медленно убывает).

В обычной жизни пренебрегать электромагнитным взаимодействием (как гравитационным) не получится: 1 г протонов, находящихся на Земле, взаимодействует с 1 г, находящихся на Солнце, ($N_p = \frac{10^{-3} \text{ кг}}{1,7 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} = 5 \cdot 10^{23}$ штук) силой равной $F_{\text{кул}} = 50 \text{ Н}$.

Электромагнитное взаимодействие заряженных частиц намного сильнее гравитационного, и единственная причина, по которой электромагнитное взаимодействие не проявляется с большой силой в космических масштабах – электрическая нейтральность материи, то есть наличие в каждой области Вселенной с высокой степенью точности равных количеств положительных и отрицательных зарядов.

Сравним электромагнитное и гравитационное взаимодействие двух протонов:

$$m_p = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ кг}; \quad F_{\text{гр}} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{(1,7 \cdot 10^{-27})^2}{r^2} = \frac{2 \cdot 10^{-64}}{r^2}, \text{ Н}$$

$$q_p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}; \quad F_{\text{кул}} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{r^2} = \frac{2 \cdot 10^{-28}}{r^2}, \text{ Н}$$

$$\frac{F_{\text{кул}}}{F_{\text{гр}}} = \frac{10^{-28}}{10^{-64}} = 10^{36}$$

Соответственно, $F_{\text{эл/м}}$ много больше $F_{\text{гр}}$.

Взаимодействие движущихся зарядов определяется силой Лоренца:

Если заряд q_1 движется со скоростью \vec{v}_1 , а заряд q_2 – со скоростью \vec{v}_2 , то сила Лоренца, действующая на второй заряд со стороны первого:

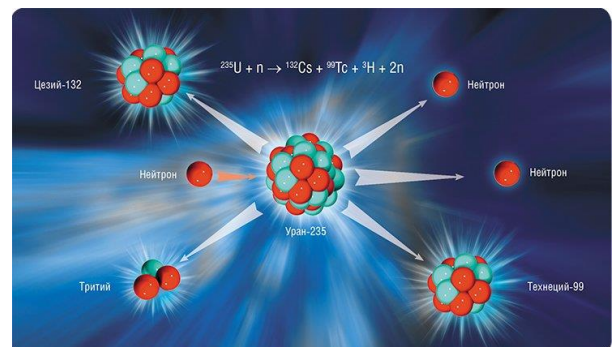
$$\vec{F}_{\text{л21}} = q_2 \vec{E}_1(\vec{r}_2) + q_2 [\vec{v}_2, \vec{B}_1(\vec{r}_2)],$$

\vec{E}_1 – электрическое поле, создаваемое первым зарядом, в том месте, где находится второй, $\vec{B}_1(\vec{r}_2)$ – магнитное поле, создаваемое первым зарядом, в том месте, где движется второй.

IV. Сильное взаимодействие

→ Отвечает за притяжение нуклонов (протонов и нейтронов) в атомном ядре, обеспечивает стабильность адронов.

→ Имеет, как и слабое взаимодействие, малый радиус действия $\approx 10^{-15} \text{ м}$.



→ Все ядерные реакции подчиняются сильному взаимодействию.

В рамках **Стандартной модели** три типа фундаментальных взаимодействий удалось объединить (не включено гравитационное взаимодействие), и они более не рассматриваются по отдельности, а считаются тремя различными проявлениями силы единой природы. Согласно этой модели, различие между фундаментальными силами взаимодействия проводится лишь постольку, поскольку в роли переносчиков этих взаимодействий выступают разные частицы-переносчики:

| | | |
|---------------------------|---|---|
| слабое → векторные бозоны | } | переносчики взаимодействия (элементарные частицы) |
| электромагнитное → фотоны | | |
| сильное → глюоны | | |

Экспериментальная проверка Стандартной модели заключается в обнаружении предсказанных ею частиц и их свойств. В настоящий момент открыты все элементарные частицы Стандартной модели, в том числе и бозона Хиггса (2012 г.). Опыты на большом адронном коллайдере (ЛHC) по состоянию на конец 2018 года значительных отклонений от СМ не обнаружили.

Гравитационное взаимодействие описывается общей теорией относительности Эйнштейна, которая объясняет его искривлением пространства-времени, и в этом смысле гравитационное поле условно нематериально. Для дальнейшего объединения фундаментальных взаимодействий используются различные подходы: теории струн, петлевая квантовая гравитация, М-теория. Для частиц-переносчиков даже придумано название гравитоны. Но пока всё это остаётся в рамках теоретических моделей.

Нефундаментальные силы:

→ упругие силы (сила упругости $F_{\text{упр}}$).

→ контактные силы (сила реакции опоры, диссипативные силы).

Упругие силы – силы, возникающие в теле в результате его деформации и стремящиеся вернуть его в исходное (начальное) состояние.

При малых деформациях упругие силы подчиняются закону Гука: сила сопротивления деформированию твёрдых тел пропорциональна величине деформации $\vec{F}_{\text{упр}} = -k\Delta\vec{r}$, где $\Delta\vec{r}$ – малое перемещение из положения равновесия, k – коэффициент упругости.

Вектор силы противоположен направлению деформации тела.

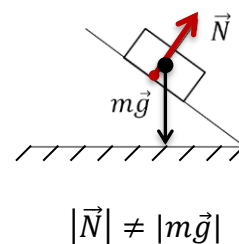
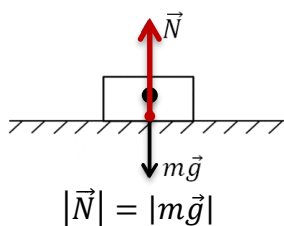
В простейшем случае одномерных малых упругих деформаций формула для силы упругости имеет вид (на примере пружины): $F_{\text{х упр}} = -k\Delta x$, Δx – величина деформации (абсолютное удлинение).

При увеличении величины деформации закон Гука перестаёт действовать, сила упругости начинает сложным образом зависеть от величины растяжения или сжатия.

Контактные силы

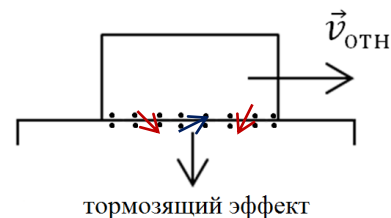
Контактными называются силы, возникающие при соприкосновении тел и действующие со стороны одного тела на другое. При этом, конечно, возникают деформации, но они обычно невелики, и тела рассматриваются как абсолютно твердые.

Сила реакции опоры \vec{N} :



Диссипативные силы (силы трения, сопротивления) в отличие от вышеперечисленных сил определяются не только взаимным расположением тел, но и относительной скоростью их движения.

Если одно тело приведено в движение относительно другого и при этом находится с ним в контакте вдоль некоторой поверхности, то частицы тел, расположенные вблизи этой поверхности, начинают друг за друга цепляться. В этом и проявляется тормозящий эффект.

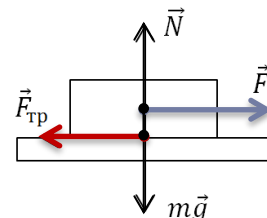


Законы для трения и сопротивления – экспериментальные законы.

Разделяют «сухое» и «вязкое» трение.

Сила «сухого» трения (характерно явление «трение покоя»)

«Сухое» трение возникает, когда между телами нет промежуточной субстанции (жидкости и газа). Такое трение возникает не только при скольжении одного тела по поверхности другого, но и при всякой попытке его вызвать («трение покоя»).



Проведем мысленный эксперимент. Возьмем тяжёлый брусок, положим его на горизонтальную поверхность. В состоянии покоя вес тела (сила тяжести) уравновешен силой

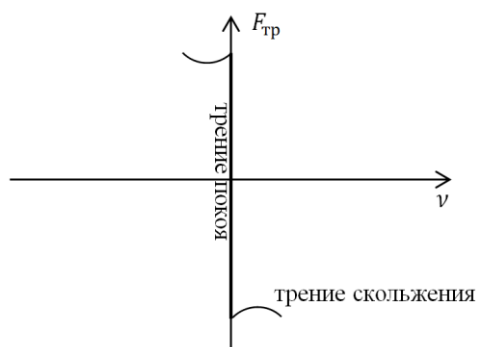
реакции опоры. Приложим горизонтально направленную силу \vec{F} , так чтобы она только тащила брусок, а не опрокидывала его.

Опыт показывает, что пока сила F – невелика, брусок находится в покое. Поскольку он не движется, ускорение равно нулю, значит со стороны поверхности на брусок действует равная по величине и противоположно направленная сила $\vec{F}_{\text{тр}}$, а именно сила трения покоя $\vec{F}_{\text{тр.п.}}$.

$$v = 0: \quad m\vec{a}_1 = \vec{F}_{\Sigma}; \quad 0 = \vec{F} + \vec{F}_{\text{тр}} \Rightarrow \vec{F}_{\text{тр}} = -\vec{F}.$$

При увеличении силы, приложенной к бруску F , будет расти и сила трения покоя, пока не достигнет некоторого определённого для данной системы значения (вертикальный участок графика).

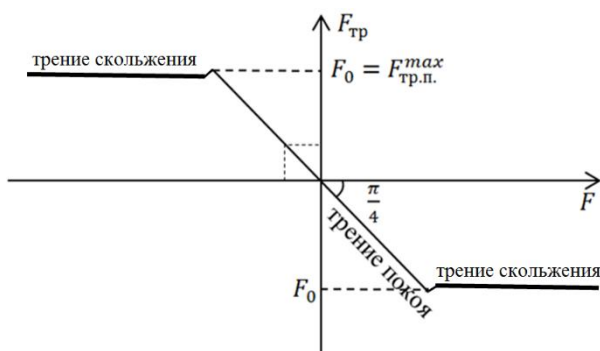
Допустим теперь брусок скользит по поверхности стола со скоростью $v \neq 0$. Сила трения, вообще говоря, будет зависеть от скорости v и будет действовать против направления движения бруска $\vec{F}_{\text{тр}} \updownarrow \vec{v}$. Сила трения сначала убывает, проходит через минимум, а затем начинает возрастать. Вся кривая симметрична относительно начала координат.



Кулон экспериментально установил, сила трения не зависит от площади поверхности, вдоль которой тела соприкасаются, и пропорциональна силе реакции опоры, с которой поверхность действует на брусок. Коэффициент пропорциональности называется коэффициентом трения, если брусок уже скользит коэффициентом трения скольжения μ . Зависимость

$\mu(v)$, как правило выражена слабо так что, если не нужна большая точность, коэффициент $\mu = \text{const}$. Величина коэффициента трения не превышает единицы $0 < \mu < 1$ и зависит от природы и состояния трущихся поверхностей.

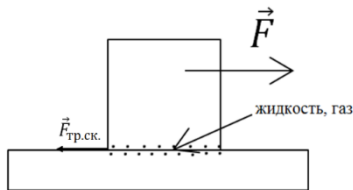
Закон Кулона для трения скольжения: $\vec{F}_{\text{тр.ск.}} = -\mu N \frac{\vec{v}}{v}, \quad F_{\text{тр.ск.}} = \mu N.$



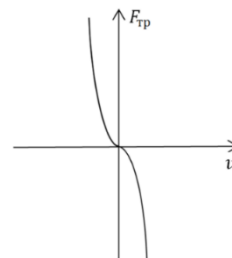
Зависимость величины силы трения от приложенной силы F имеет вид симметричной кривой. В соответствии с предыдущим графиком пока не наступило скольжение $F_{\text{тр.п.}}$ может принимать любые значения, определяемые приложенной силой. После начала скольжения сила трения становится

постоянной, равной $F_{\text{тр.ск.}}$. В задачах, когда не требуется высокая точность $F_{\text{тр.ск.}} = F_{\text{тр.п.}}^{\text{max}}$. Скольжение одного тела по поверхности другого начинается, когда $F \geq F_{\text{тр.п.}}^{\text{max}}$.

«Вязкое» трение



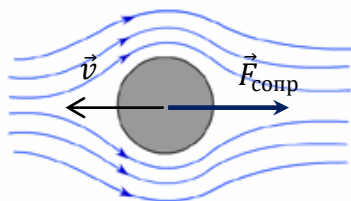
Вязкое трение возникает, когда между поверхностями соприкасающихся тел есть жидкая или газообразная прослойка. Если к телу приложить силу в этом случае, оно сразу приходит в движение (явление «трения покоя» отсутствует).



Сила сопротивления

На тело, движущееся в жидкости или газе, действует сила сопротивления $F_{\text{сопр}}$ окружающей тело среды. Как и сила трения, сила сопротивления направлена противоположно скорости движения тела $\vec{F}_{\text{сопр}} \updownarrow \vec{v}$. Величина силы сопротивления зависит от характера обтекания тела окружающей средой.

→ При небольших скоростях движения ($v < v_{\text{звука в среде}}$) обтекание тела носит ламинарный характер.

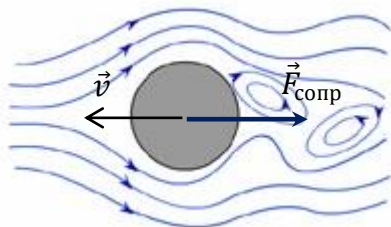


Закон Стокса:

$$\vec{F}_{\text{сопр}} = -\alpha \vec{v} = -\alpha v \frac{\vec{v}}{|\vec{v}|},$$

α – коэффициент пропорциональности, зависящий от размера тела и вязких свойств среды.

→ При больших скоростях течение среды приобретает турбулентный характер.



Закон Ньютона:

$$\vec{F}_{\text{сопр}} = -\beta v \vec{v} = -\beta v^2 \frac{\vec{v}}{|\vec{v}|},$$

β – коэффициент пропорциональности, зависит от размеров и формы тела, а также от плотности среды.

